

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.003

基于虚拟现实试验场景的驾驶模拟系统研发

杨亚联^{1a,1b}, 戴济顺^{1a}, 谢 潇²

(1.重庆大学 a.汽车工程学院;b.机械传动国家重点实验室,重庆 400044;
2.襄阳达安汽车检测中心,湖北 襄阳 441004)

摘要:为解决驾驶模拟系统视景显示中的显示画面粗糙及驾驶员视角固定等问题,采用 3Ds Max 建立了垫江某汽车综合试验场三维高精度模型,并基于 Unity 3D 和 HTC Vive 搭建了虚拟现实显示系统,进行汽车试验场完整环境的渲染和 VR 显示。最后通过 Labview RT 和 Carsim 搭建了汽车动力学仿真平台,至此完成了基于 VR 的驾驶模拟系统构建的全部过程。仿真结果表明:基于虚拟现实试验场景所开发的驾驶模拟系统显示画面良好,且驾驶员具有较高的视场角及自由灵活的观察视角,有效提升了驾驶员沉浸感。

关键词:虚拟现实;汽车试验场;3D 建模;驾驶模拟器

中图分类号:U270.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)01-001-10

Development of driving simulation system based on virtual reality test scene

YANG Yalian^{1a,1b}, DAI Jishun^{1a}, XIE Xiao²

(1a. School of Automotive Engineering; 1b. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. National Automobile Quality Supervision Test Center, Xiangyang, Hubei 441004, P. R. China)

Abstract: In order to solve the problems of vague sight and unchangeable driver's perspective in the visual display of driving simulation system, the 3D model of Dianjiang Vehicle Proving Ground(VPG) is built by 3Ds Max. Then, the virtual reality display system is built based on Unity 3D and HTC Vive, which realizes the rendering and VR display of the whole environment of the VPG. Finally, the car dynamic simulation platform is built with Carsim and Labview RT. Thus, all the driving simulation system construction steps based on VR are completed. The simulation results show that the driving simulation system based on virtual VPG has high definition sight, and the driver has high elevation angel and flexible observation angle, which effectively improves the driver's immersion.

Keywords: virtual reality; vehicle proving ground; 3D modeling; driving simulators

收稿日期:2019-05-20 网络出版日期:2019-07-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575064);重庆市科委科技攻关重点资助项目(CSTC2015ZDCY-ZTZX60003)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51575064) and Key Scientific and Technological Research Projects of Chongqing Science and Technology Commission(CSTC2015ZDCY-ZTZX60003).

作者简介:杨亚联(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事动力传动及控制、车联网等研究,(E-mail) yyl@cqu.edu.cn.

目前中国已成为世界上第一大汽车生产和消费国,且逐年增长的汽车市场带来了行业内的激烈竞争,驾驶员对汽车驾驶性能也有了越来越高的要求。在产品开发前期就引入人机交互的测评手段,采用模拟驾驶系统进行仿真测试,对于确保产品的成功开发和性能需求,奠定了良好的基础。

汽车试验场可重现汽车行驶过程中遇到的各种道路和驾驶场景,是验证测试汽车性能的重要手段。因此,国外已建立了众多的汽车试验场,如美国阿伯丁试验场与 Milford 试验场、德国 ATP 试验场、英国 MIRA 试验场等^[1]。中国于 1958 年始,先后建立了海南试验场、襄阳试验场、定远试验场、中汽盐城试验场、上汽通用泛亚广德试验场、重庆西部试验场等^[2-3]。

搭建实际场地进行测试验证耗资巨大,且会受到时间和天气等不可控因素影响。随着计算机仿真技术的发展,使在 VR 场景下通过驾驶模拟系统进行汽车相关的模拟仿真测试成为了可能。丰田交通研究所的 Mimura 等^[4]在虚拟道路上通过驾驶模拟系统研究高龄人士开车时限速的必要性;美国弗吉尼亚大学 Brown 等^[5]在虚拟环境下,通过模拟驾驶系统测试自动驾驶车辆对于正常人驾驶的影响;美国爱德华大学的 Brown 等^[6]通过 NADS 在虚拟场景下测试不同的酒精浓度对驾驶的影响。

驾驶模拟系统采用传统的视景显示会造成显示视角固定及画面显示粗糙等问题,因此,提出了一种基于 VR 试验场景的驾驶模拟系统研发方案。参照垫江某汽车综合试验场等比例建立了 3Ds Max 模型,并使用 HTC Vive 和 Unity 3D 搭建虚拟现实显示系统。采用 Labview RT 和 Carsim 构建汽车动力学仿真模型,实现了驾驶模拟在虚拟现实仿真条件下的人机交互。仿真结果表明:所构建的驾驶模拟系统实现了预期的开发功能和需求,场景显示良好,并可给予驾驶员更广、更自由的驾驶视角。

1 汽车综合试验场建模

1.1 高速环道建模

汽车试验场中的高速环道可供试验车进行连续高速行驶。文中高速环道设计形状为长圆形,其三维模型的设计可分为水平面线型和横断面线型,见图 1 所示。

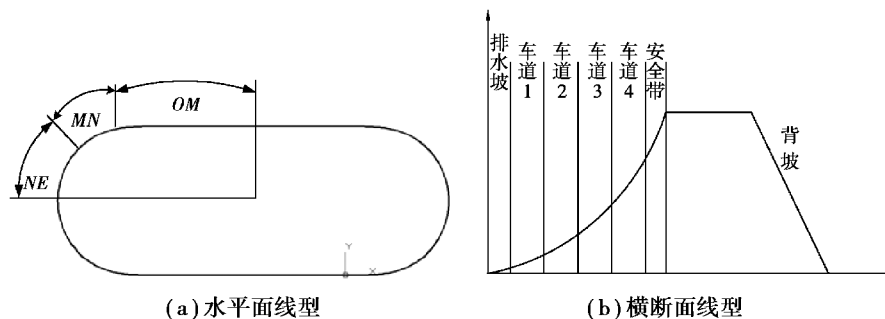


图 1 高速环道三维模型设计

Fig. 1 3D model design of high speed loop

1) 水平面线型设计。水平面线型一般由直线段 OM 、缓和曲线段 MN 、圆曲线段 NE 组成。直线段曲率为 0, 圆曲线段曲率为 $1/r$, 缓和曲线段能使圆曲线和直线之间的曲率平滑过度, 是水平面线型设计的重点。

依据布劳斯曲线, 缓和曲线段 MN 上任意点的 x, y 坐标为:

$$\left\{ \begin{array}{l} k = (1/r) \cdot [3 \cdot (l/S)^2 - 2 \cdot (l/S)^3], \\ \theta = \int k dl = \frac{l^3}{r \cdot S^2} - \frac{l^4}{2 \cdot r \cdot S^3}, \\ x = \int_0^l \cos\theta dl, \\ y = \int_0^l \sin\theta dl, \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: k 为缓和曲线曲率; l 为缓和曲线某点处弧长; r 为圆曲线段半径; S 为缓和曲线段全长; θ 为缓和曲线

段某点倾斜角; x, y 为缓和曲线段某点坐标。

依据式(1),圆曲线半径 r 为 400 m,缓和曲线全长 S 为 400 m,据此计算 l 值处环道中心线 xy 的坐标值,从而得到高速环道水平面线型。

2)横断面线型设计。由于高速环道的最高车速较大,需设计横向超高角 β (坡度倾角)抵消汽车高速行驶时产生的离心力。即

$$\beta = \arctan \left(\frac{v^2}{g \cdot r} \right), \tag{2}$$

式中: g 为重力加速度; r 为弯曲半径; v 为汽车速度; β 为横向超高角。

圆曲线段 NE 的横断面线型设计。该试验场设置了 4 条高速环道,车道至内向外,车速分别为 80、120、160、200 km/h。车速不同,则其横向超高角不同,因此选择 3 次抛物线作为横断面曲线(见图 1(b)横断面线型所示),使环道横断面间车速分布得更为连续均匀^[8]。以第一车道边界作为圆曲线横断面曲线起点,以曲线在每条车道中心线的一阶导数为该车道横向超高倾角的正弦值,求解该曲线方程。

缓和曲线 MN 段的横断面型设计。由于缓和曲线各点曲率不同,则其横断面曲线方程不同,为避免曲线方程过多,以造成建模三角面过多,并引起场景渲染卡顿,所以只在缓和曲线段距起点每间隔 40 m 处计算其横断面线型方程。方程计算方式与圆曲线一致,最终的设计线型见图 2 所示。

3Ds Max 中基于水平面线型及横断面线型设计的汽车试验场高速环道模型见图 3 所示。

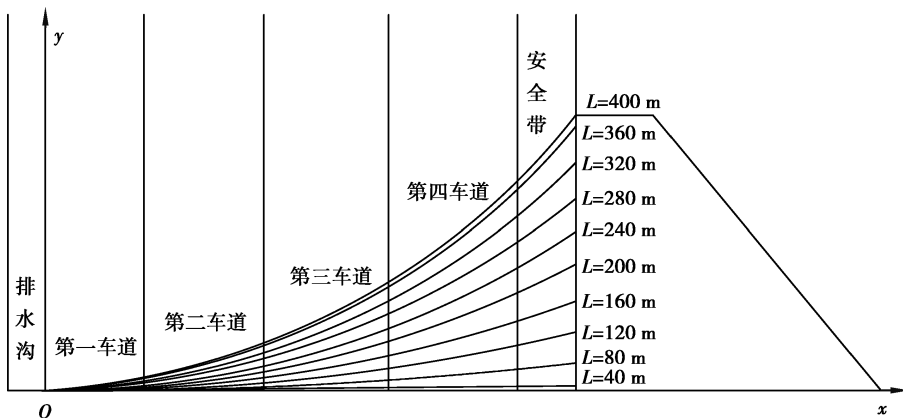


图 2 缓和曲线横断面线型

Fig. 2 Cross section line of transition curve



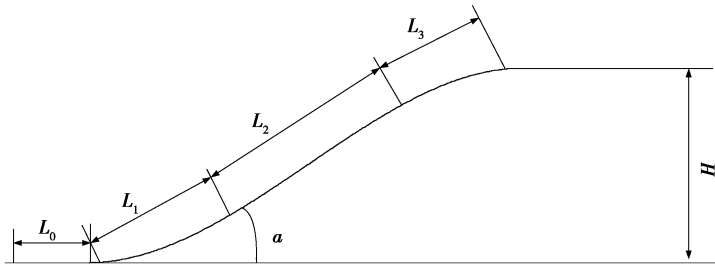
图 3 高速环道三维模型

Fig. 3 3D model of high speed loop

1.2 标准坡道建模

为了测试车辆的纵坡通过性和车辆动力性,依据国标 GB/T 12539—2018^[9],设计的标准坡道见图 4 所示。

该汽车试验场中建设了 6 条标准坡(参数见表 1)。道路设计为 5 m 单车道,3Ds max 中建立的三维模型见图 5 所示。



注:图中 L_0 为坡前平直段; L_1 为坡前过渡曲线; L_2 为有效试验段; L_3 为坡顶过渡曲线; H 为坡道总高度

图 4 标准纵坡示意图

Fig. 4 The standard longitudinal slope

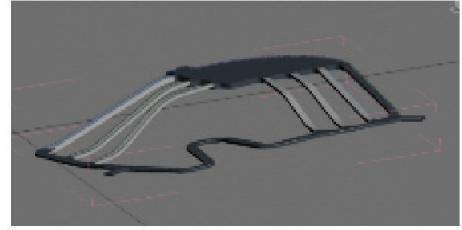


图 5 标准纵坡 3D 模型

Fig. 5 3D model of standard longitudinal slope

表 1 标准纵坡参数

Table 1 Standard longitudinal slope parameters

| 序号 | 坡度 $\alpha/\%$ | L_0/m | L_1/m | L_2/m | L_3/m | H/m |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | 10.0 | 9.38 | 9.97 | 112.5 | 8.97 | 12.14 |
| 2 | 16.6 | 9.94 | 14.81 | 60.0 | 19.75 | 12.67 |
| 3 | 20.0 | 10.00 | 17.76 | 45.0 | 17.76 | 12.32 |
| 4 | 30.0 | 7.99 | 11.65 | 85.0 | 17.49 | 28.70 |
| 5 | 40.0 | 10.00 | 15.22 | 60.0 | 22.83 | 29.43 |
| 6 | 60.0 | 10.00 | 21.62 | 30.0 | 32.24 | 29.69 |

1.3 其他试验道路建模

该试验场中还有直径 300 m 的动态试验广场,用于动态转向、最小转弯半径、直角转弯试验;测试路段长 400 m,3 车道,宽 9 m 的舒适性道路,用于车内噪声、平顺性测试、异响测试评价;车道总长约 4 280 m,2 车道,宽 8 m 的综合评价道路,包含多种不同半径弯道、不同纵向坡度坡道,用于整车性能主观评价、磨合试验等;车道总长约 2 000 m,宽 15 m 的基本性能环道,用于动力性测量、挂档滑行测试、直接加速性能测试等。最终搭建起的完整汽车综合试验场模型见图 6 所示。

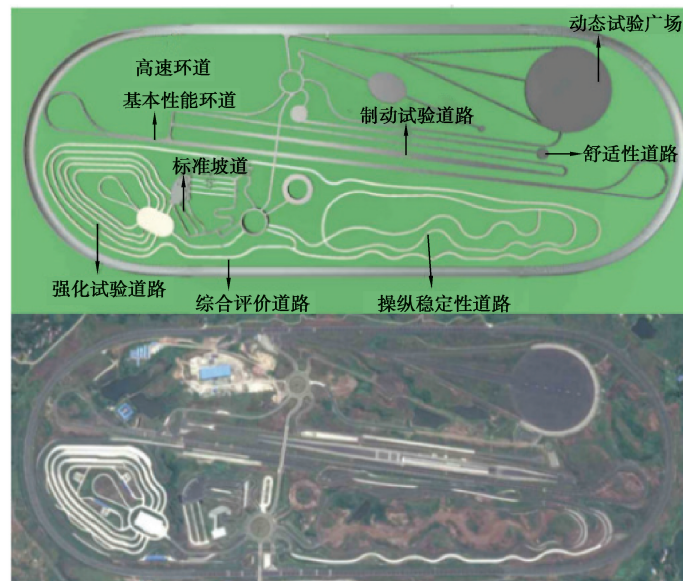


图 6 汽车综合试验场道路模型

Fig. 6 Road model of the VPG

2 基于 VR 的汽车试验场显示

2.1 基于虚拟现实的视景显示系统

驾驶模拟系统的传统视景显示中存在着显示视角固定或画面较为粗糙等问题。而结合 VR 技术及物理仿真引擎可搭建出视角自由、画面精细的视景显示系统。

笔者在分析目前基于 VR 的视景显示方案的基础上^[10-12],采用 HTC Vive 作为虚拟现实开发硬件,通过双目双屏的图像视角差形成立体视感。双屏分辨率为 $2\ 160 \times 1\ 200$,像素密度为 447 PPI,刷新率为 90 Hz,能满足人眼视觉的高清显示^[13]。

采用 Unity 3D 作为虚拟现实开发软件。Unity 3D 对 DirectX 和 OpenGL 等底层图形 API 具有高度优化的图形渲染通道^[14],并内置有基于开源 SDK OpenVR 构建而成的 Steam VR 插件,支持 VR 硬件的接入和信息封装^[15],方便了虚拟现实显示系统的研发。

虚拟现实视景显示系统采用 HTC Vive 作为显示设备,Unity 3D 作为图形仿真及渲染引擎。虚拟现实系统显示原理见图 7 所示,HTC Vive 两基站捕捉头显设备运动,将运动信息传递至 Unity 3D,其中的 Steam VR 再根据头部旋转信息切换人眼实时所见画面,并将其转换为左右眼双屏显示,输出至头显设备,实现场景的 3D 立体显示。

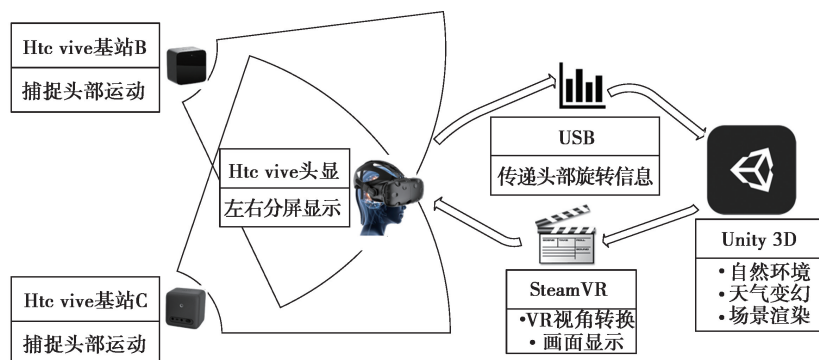


图 7 虚拟现实视景显示原理

Fig. 7 Principles of VR visual display

2.2 基于虚拟现实的汽车试验环境搭建

实现了虚拟视景显示后,还需在 Unity 3D 中搭建完整的汽车试验场环境,包括自然环境、试验场测试道路、实时天气系统。

1) 环境地形。Unity 3D 中的 Terrain 工具可创建地形及设置地面纹理贴图,并根据距离远近切换显示模型精细度,提高渲染速度。

2) 试验场道路。通过 3D max 完成汽车试验场道路建模,考虑到模型的通用性,将其导出为 FBX 格式,并导入至 Unity 3D Asset 中作为预制件,便于 Unity 3D 中的管理与场景搭建。

3) 天气系统。天气系统的创建主要运用了天空盒和粒子系统,可模拟出黄昏、夜晚的明暗显示,以及雨天、雪天等不同天气下的变换效果(见图 8)。

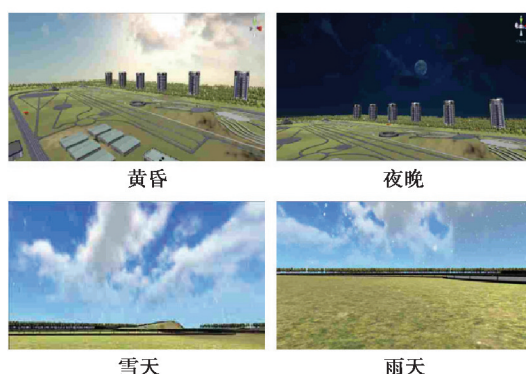


图 8 场景渲染

Fig. 8 Scene rendering

2.3 基于虚拟现实的驾驶员所见画面显示

搭建了 VR 视景显示系统及汽车试验场景后,还需模拟出驾驶员的显示视角,从而确定视角显示画面,并将该处画面传输至头显设备,使驾驶员具有三维沉浸感的视觉体验。具体分为以下 3 个步骤完成。

1)Unity 3D 中驾驶员所见画面显示。为获得驾驶员在汽车试验场中的所见画面,需创建 Camera 仿真模型。汽车试验场环境下的所有物体在虚拟世界中都具有唯一世界坐标,而 Camera 模型根据世界坐标-摄像机坐标-裁剪坐标-屏幕坐标的坐标变换,计算汽车试验场中的模型在 Camera 中的显示位置,并将 Camera 处的所见画面实时显示。在运行过程中将 Camera 仿真模型放置于驾驶员人眼处,即可模拟出驾驶员的所见画面。

2)HTC Vive 中驾驶员所见画面显示。Steam VR 的 CameraRig 已整合 Camera 仿真模型,在设置了 CameraRig 的各项属性后,便可实时调取 CameraRig 处的显示画面(见图 9),而后将其转换为左右眼分屏的 VR 显示,通过 HDMI 线传输画面至 HTC Vive 头显屏幕中,实现 VR 头显处的驾驶员所见画面重现。

3)HTC Vive 中驾驶员所见画面切换。随着驾驶员头部的位姿变化,头显设备的坐标信息会通过 Steam VR 传输至 Unity 3D 中,并实时更新 CameraRig 位姿,通过 CameraRig 在汽车试验场景下的坐标变化来改变头显设备中的显示画面,保证驾驶员的所见画面跟随头部运动而变化。

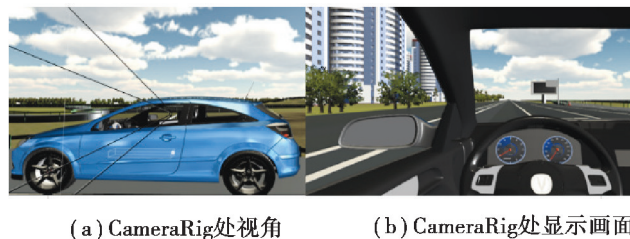


图 9 CameraRig 处显示画面

Fig. 9 Display at CameraRig

3 基于 VR 的驾驶模拟系统研发

3.1 驾驶模拟系统架构设计

驾驶模拟系统是在人-车-路环境下的闭环仿真系统。但基于 VR 的汽车试验场景不能直接建立汽车动力学仿真模型,反映出汽车的运动状态,还需结合 Carsim 及 Labview RT 搭建汽车动力学联合仿真平台。所构建的驾驶模拟系统见图 10 所示。

驾驶员根据 VR 头显设备中的虚拟场景来操纵罗技 G27,通过汽车动力学仿真平台采集驾驶员操控设备信号,结合整车动力学模型及虚拟道路,解算出实时的汽车位姿信息,并发送至 Unity 3D,以驱动虚拟汽车运动。同时 Unity 3D 根据头部位姿信息,并通过坐标变换和 Steam VR,实现驾驶员在头显设备中的所见场景切换,从而形成闭环仿真。

3.2 驾驶模拟系统中驾驶操控设备

罗技 G27 作为驾驶员操控设备,通过 USB 接口及罗技驱动连接至 Host PC 中。由 Host PC 的 Labview 程序采集方向盘及踏板数据,并对采集到的数据进行预处理,使其适应车辆动力学模型输入。

3.3 驾驶模拟系统中汽车动力学仿真平台架构

本驾驶模拟系统采用了基于 Labview RT 及 CarSim 的联合仿真架构搭建车辆动力学实时仿真平台。

Labview RT 仿真环境由软件 Labview 和硬件 NI PXI 8108 两部分构成。Labview 是一种使用图形化编程语言的开发环境,NI PXI 8108 为 NI 公司的高性能实时控制器。在 Host PC 端使用 Labview 的 Real-Time 模块开发 Labview RT 程序,并通过以太网将程序下载至 NI PXI 8108,从而建立实时运行环境。

Carsim 针对 Labview RT 开发了 3 个子 VI,分别为仿真初始化(*_Init.vi)、单步迭代(*_Step.vi)、仿真终止(*_Terminate.vi),以便嵌套入 Labview RT 程序中,并在每一次仿真循环中可重复调用。

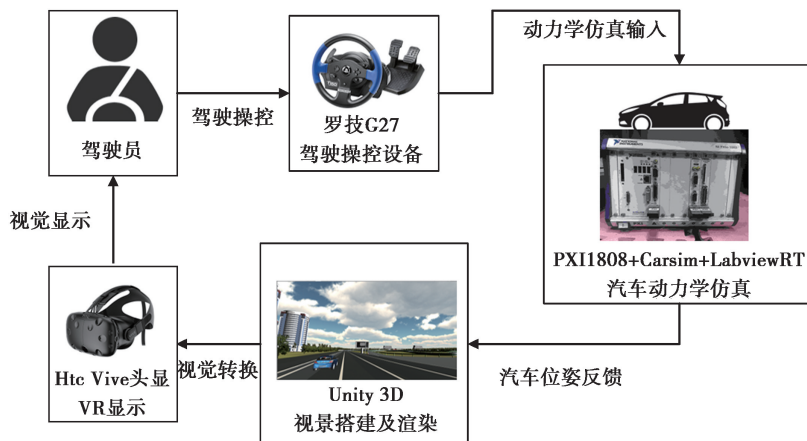


图 10 驾驶模拟系统架构

Fig. 10 Driving simulation system architecture

在 Host PC 中编写好 Labview RT 程序,程序首先将罗技 G27 驾驶数据作为动力学输入参数,然后将 Carsim 子 VI 嵌套入 Labview RT 程序中,通过其解算 Unity 3D 端的汽车位姿信息。最后配置通讯 IP 地址后,即可通过以太网将实时程序下载至 PXI-8108 控制器中实时运行,仿真架构见图 11 所示。

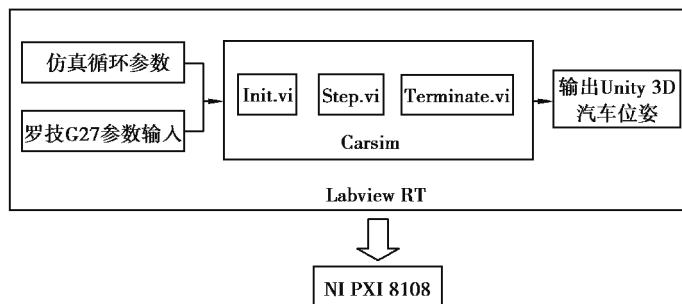


图 11 Labview RT 与 Carsim RT 联合仿真构架

Fig. 11 The co-simulation of Labview RT and Carsim RT

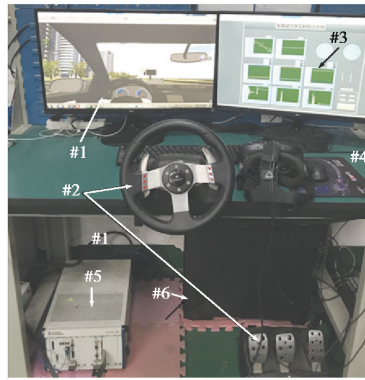
3.4 驾驶模拟系统中虚拟试车场 VR 显示

通过 Unity 3D 及 HTC Vive 构建出基于 VR 的视景显示系统。Unity 3D 通过 TCP 实现与汽车动力学仿真平台间的通讯,即通过 Labview 编写程序作为服务器端,发送汽车位姿,Unity 3D 使用 C# 编写程序作为客户端,IP 地址为本机连接的“127.0.0.1”。利用 C# 中 Spilt 函数处理数据,读取汽车位姿数据,实时计算当前的驾驶员视角下的显示画面,并结合头部位姿将渲染画面输出至 HTC Vive 头显,实现驾驶画面的 3D 立体显示。

4 基于 VR 的驾驶模拟系统仿真

4.1 驾驶模拟系统搭建

笔者基于汽车虚拟试验场及动力学仿真平台搭建的驾驶模拟系统见图 12 所示。



注: #1 为 Unity 3D 端视景显示; #2 为驾驶操控设备; #3 为动力学监控界面; #4 为虚拟头显设备; #5 为动力学仿真平台; #6 为 Host PC

图 12 驾驶模拟系统实景图

Fig. 12 Actual photos of the driving simulation system

4.2 驾驶模拟系统实时仿真

为验证基于虚拟现实的驾驶模拟系统的可行性,进行了如下实验。

驾驶员头戴 VR 头显,通过罗技 G27 设备操控汽车,操控信息经由汽车动力学仿真平台解算后,将汽车位姿信息输出至 Unity 3D 端,Unity 3D 端实时更新头显显示画面。

1) 显示效果良好。Unity 3D 端可完整的显示出汽车试验场环境,包括道路、树木、天空等重要场景模型(见图 13(b)),其相较于 Carsim 中的模拟场景(见图 13(a)),更加符合真实驾驶环境。

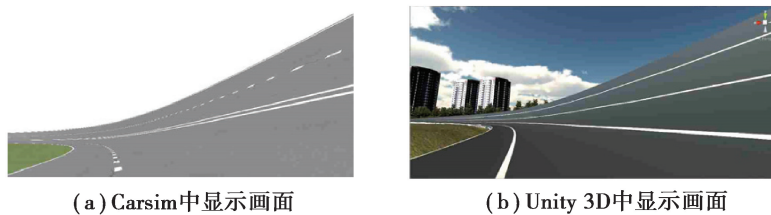


图 13 Unity3D 与 Carsim 中的汽车试验场显示

Fig. 13 The display of VPG in Unity3D and Carsim

2) 驾驶视场角得到有效提升。正常人的双目立体视场角(FOV, field of view)约为 120° ,而传统视景显示下的单屏仅提供 $60^\circ \sim 90^\circ$ 的 FOV,通过在 Unity 3D 中改变 FOV 值来模拟不同的 FOV 下的场景显示,其单屏下的显示效果图 14(a)和图 14(b)所示。实时仿真中 VR 头显的 FOV 则增至 110° ,转换为屏幕下的显示效果见图 14(c)所示,其 FOV 相较于非 VR 的单屏增加了约 $22\% \sim 83\%$,逼近真实的人眼立体 FOV。且通过图 14 的综合对比分析,VR 模式可有效扩展驾驶员双眼的可观察画面。

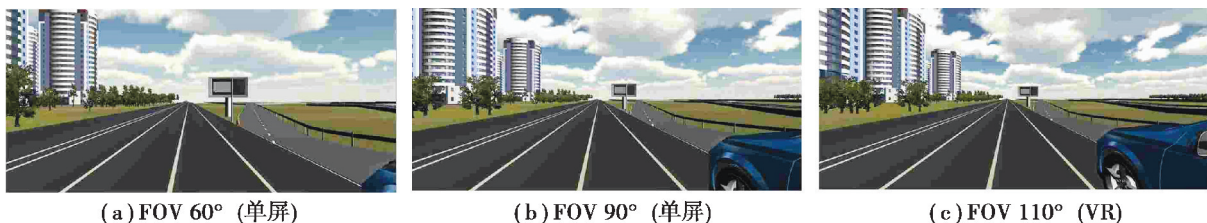


图 14 不同 FOV 下的显示画面

Fig. 14 The display under different FOV

3) 驾驶员前方可观察视角得到提升。VR 头显中显示画面随着头部运动而变化,见图 15(a)即反映出驾驶员头部左偏下的朝向及此时的所见画面。通过对比分析,VR 显示下的观察视角相较于传统单屏下的固定

视角(见图 15(b)),可使驾驶员前方的自由观察视角增加至 180° (见图 15),与真实驾驶时的观察视角一致,有效增强驾驶沉浸感。

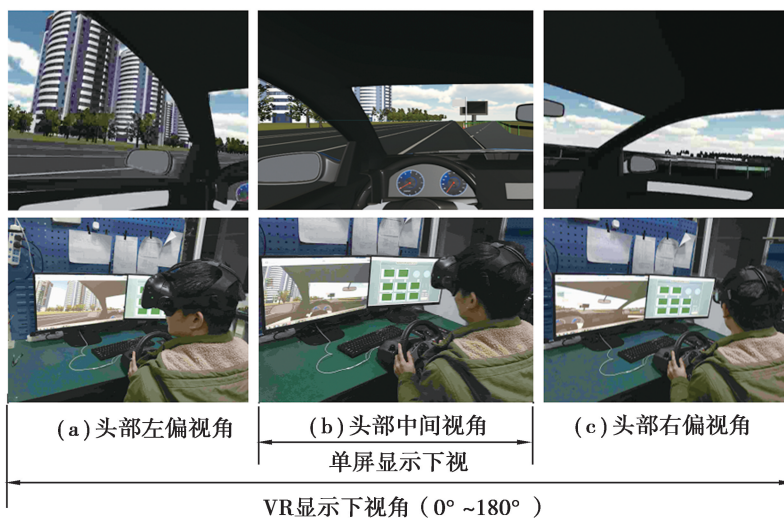


图 15 Unity 3D 中的 VR 视角

Fig. 15 VR perspective in Unity 3D

5 结 论

根据汽车综合试验场标准参数,在 3Ds Max 中等比例建立了垫江某试验场模型,并结合 Unity 3D 及 HTC Vive 完成了 VR 视景显示系统开发,通过 Labview RT 及 Carsim 完成了汽车动力学实时仿真,最终完成了基于 VR 试验场景的完整驾驶模拟系统研发。

基于虚拟现实试验场景的驾驶模拟系统中的场景较 Carsim 更为丰富,且与驾驶模拟系统的传统单屏显示相比,其 FOV 增加了 $22\% \sim 83\%$,其驾驶员前方的视角范围从单屏的固定视角增加至自由的 180° ,驾驶显示视角更广、更灵活,符合实际驾驶状态。

参考文献:

- [1] 周金宝. 汽车试验场总论 [M]. 中国科学技术出版社, 2013.
Zhou J B. Pandect of the automotive proving ground [M]. Science and technology of China press, 2013. (in Chinese)
- [2] 马敬贵. 上海通用试车场施工测量控制[J]. 科技视界, 2014(6): 103,171.
Ma J G. Construction survey control of Shanghai General Test Yard[J]. Science & Technology Vision, 2014(6): 103, 171.(in Chinese)
- [3] 夏一仁, 张晓峰. 长安 13 亿巨资打造国内最大动态试验场[J]. 中国经济周刊, 2014(13): 68-69.
Xia Y R, Zhang X F. 1.3 billion yuan is used to build the largest dynamic test site in China by Chang'an[J]. China Economic Weekly, 2014(13): 68-69.(in Chinese)
- [4] Mimura Y, Obayashi F, Ono T, et al. Effects of intelligent speed adaptation on elderly drivers' driving behaviors and mental workloads[J]. International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2017, 15(2): 63-72.
- [5] Brown B, Park D, Sheehan B, et al. Assessment of human driver safety at Dilemma Zones with automated vehicles through a virtual reality environment[C]//2018 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), 27-27 April 2018, Charlottesville, VA, USA, 2018: 185-190.
- [6] Brown T, Milavetz G, Murry D J . Alcohol, drugs and driving: implications for evaluating driver impairment[C]// Association for the Advancement of Automotive Medicine. Proceedings of the 57th Annual Scientific Conference of the Association for the Advancement of Automotive Medicine, September 23, 2013-September 25, 2013, Quebec City, QC, Canada, F, 2013.

- [7] 王文虎, 魏建明. 满足行车舒适度的布劳曲线设计标准的建立[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 284-286.
Wang W H, Wei J M. Establishment of design standard for brauss curve to satisfy driving comfort [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 284-286.(in Chinese)
- [8] 李明睿. 车道宽度以弧长定义的高速环道横断面设计研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(12): 30-36.
Li M R. Study on high-speed track section design in which lane width defined as curve length[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(12): 30-36.(in Chinese)
- [9] 安徽江淮汽车集团股份有限公司, 国家汽车质量监督检验中心, 柳州五菱汽车工业有限公司, 等. 汽车爬陡坡试验方法[M]. 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 2018.
Anhui Jianghuai Automobile Group Co., Ltd., National Automobile Quality Supervision and Inspection Center, Liuzhou Wuling Automobile Industry Co., Ltd., et al. Motor vehicles steep hill climbing test method[M]. State Administration for Market Regulation; Standardization Administration of the People's Republic of China, 2018.(in Chinese).
- [10] Coburn J Q, Freeman I, Salmon J L. A review of the capabilities of current low-cost virtual reality technology and its potential to enhance the design process[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(3): 031013.
- [11] Schlueter J, Baiotto H, Hoover M, et al. Best practices for cross-platform virtual reality development[C]//SPIE Defense + Security. Processings of SPIE 10197, Degraded Environments: Sensing. Anaheim, California, USA. 2017: 1019709.
- [12] Tham J, Duin A H, Gee L, et al. Understanding virtual reality: presence, embodiment, and professional practice [J]. IEEE Transactions on Professional Communication, 2018, 61(2): 178-195.
- [13] Chen D L, Liu H, Ren Z G. Application of wearable device HTC VIVE in upper limb rehabilitation training[C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Xi'an, China, 2018: 1460-1464.
- [14] Messaoudi F, Ksentini A, Simon G. Dissecting games engines; the case of unity 3D[C]// the International Workshop on Network and Systems Support for Games.
- [15] Messaoudi F, Simon G, Ksentini A. Dissecting games engines; The case of Unity3D[C]//2015 International Workshop on Network and Systems Support for Games (NetGames). Zagreb, Croatia, 2015: 1-6.
- [16] Egger J, Gall M, Wallner J, et al. Integration of the HTC Vive into the medical platform MeVisLab[C]//Proceedings of the Medical Imaging 2017: Imaging Informatics for Healthcare, Research, and Applications, February 15, 2017-February 16, 2017, Orlando, FL, United states, F, 20172017.

(编辑 詹燕平)